

有限要素解析におけるマイクロ組織予測システムの開発

1. はじめに

近年、有限要素解析 (FE 解析) を用いた塑性加工の工程設計の取り組みが盛んに行われ、多くの実績が報告されつつある。しかしながら一般的な FE 解析から得られる情報は、変形体 (ワーク) の形状、温度、応力、ひずみにほぼ限定され、工程設計技術者が工程の優劣を直接的に判断するための情報は限定される。とくに、目的とする材質 (結晶粒径や機械特性) を造り込む場合、汎用 FE 解析コードからは、直接的な情報は得られない。

大同特殊鋼 (株) では、塑性加工のプロセス設計を行うにあたり、結晶粒径分布など目的とする設計値を定量的に得ることができる、デジタル・エンジニアリングシステム DAINUS^R (DAI do NUmerical Process Engineering System) の開発を行ってきた。DAINUS^R はワークの割れ予測、マイクロ組織予測、金型寿命予測、ボイド封孔予測を可能とする四つの予測モジュールから成り、製品の品質や、製造コストの定量的な予測が可能なシステムである。本稿では、特にマイクロ組織予測を取り上げ、その原理と適用事例を紹介する。

2. マイクロ組織 (結晶粒径) 予測システム

図 1 に鍛造加工中におけるマイクロ組織の変化を示す。熱間域で鍛造加工を行うと、再結晶と呼ばれる新たな結晶粒の形成が行われる。新たに形成された再結晶粒は、時間とともに粗大化 (粒成長) し、同時に再結晶粒の占有面積率も増加する。鍛造加工後のマイクロ組織は、再結晶粒の粒成長と再結晶粒の占有面積率でほぼ支配されるため、この二つを予測することで、連続的にマイクロ組織を予測することが可能となる。

しかしながら、鍛造加工中の粒成長、再結晶の進展挙動は非常に複雑で、材料の初期状態、温度、ひずみ、加工速度などの影響を強く受ける。さらに、鍛造加工中の材料は、金型への抜熱や加工付与による局所的発熱により、強い温度こう配とひずみこう配を有するため、再結晶挙動はさらに複雑となる。

このため、温度やひずみといった再結晶の各支配因子を分離して、再結晶挙動に及ぼす影響度を詳細に調査する必要がある。一例として、発電用ガスタービンディスク用素材として用いられる Inconel 718 の熱間鍛造時の再結晶挙動を図 2 に示す。保持時間の増加にともない、再結晶の進行と再結晶粒の粒成長が生じていることがわかる。温度、ひずみ、ひずみ速度、初期結晶粒径の影響も同様に調査を行い、得られた結果をもとに、再結晶進展速度は avrami 型の式 (1)、再結晶粒の粒成長挙動は sellars の式 (2)⁽¹⁾ を用いて、再結晶挙動の予測式を構築した。得られた予測式はユーザサブルーチンを用いて、FE 解析コードに導入し、マイクロ組織予測システムを構築した。図 3 にシステムのフローチャートを示す。

$$X_{rex} = 1 - \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$t_{0.5} = C_1 \varepsilon^{C_2} d_0^{C_3} \exp \left(\frac{-Q_s}{RT} \right)$$

X_{rex} : 再結晶面積率, t : 時間, T : 温度, $C_1 \sim C_3$: 材料定数, Q_s : 活性化エネルギー, ε : ひずみ, d_0 : 初期粒径

$$d_{yrex}^4 = d_0^4 + C_4 t \exp \left\{ -Q_{grow} / (RT) \right\} \quad (2)$$

d_{yrex} : 再結晶粒径, C_4 : 材料定数, Q_{grow} : 活性化エネルギー

3. 活用事例

DAINUS^R を用いた、Inconel 718 ガスタービンディスクの工程設計事例を紹介する。

ガスタービンディスクは、高温・高圧環境下で長期間使用されるため、素材には高い信頼性が求められる。素材の必要強度を確保するため、一般的に 90 μ m 以下の結晶粒径が要求される。この種の合金系では相変態を利用した結晶粒微細化が不可能なため、鍛造工程のみで微細化を達成しなければならない。そこで、DAINUS^R を活用し、 Φ 900 \times 160H のタービンディスクの鍛造工程の最適化を試みた事例を図 4 に示す。図 4 は製造結果と予測値との比較結果を示しているが、均質で良好なマイクロ組織と良好な予測精度が得られている。

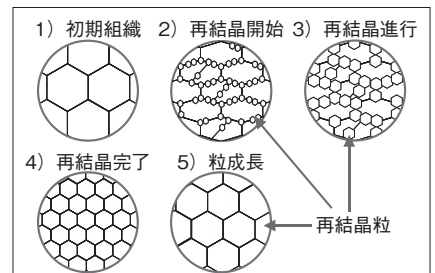


図 1 熱間鍛造中のマイクロ組織変化

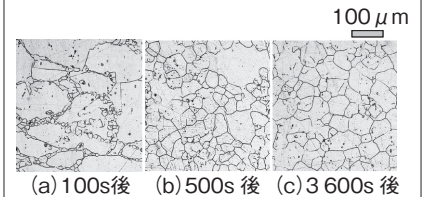


図 2 Inconel 718 の再結晶挙動 (950°C, 30% 圧下後恒温保持)

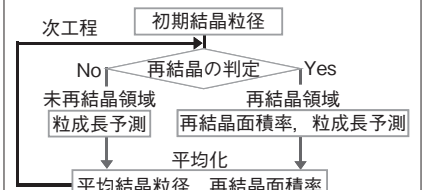


図 3 システムフローチャート

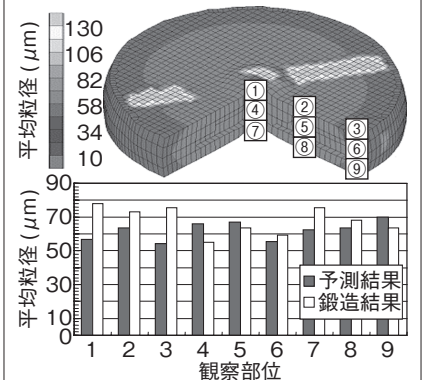


図 4 結晶粒径分布の比較

4. おわりに

このように、マイクロ組織予測が難しいとされる大型製品の鍛造においても、DAINUS^R の予測精度は非常に高く、製品品質に直結した塑性加工プロセス設計ツールとしての活用範囲は非常に広い。今後もさらに、適用可能範囲を広げていきたい。

(原稿受付 2008 年 10 月 7 日)

[八田武士 大同特殊鋼 (株)]

●文献

- (1) Sellars, C.M., Modelling microstructural development during hot rolling, Mater. Sci. Technol., 6-11 (1990), 1072-1081.